

**プロファイリングフロートの適切な海面漂流時間
—欠損のない観測プロファイルを得るために—**
Running title: フロートの適切な海面漂流時間の決定法

中島宏幸¹・小林大洋²・四竈信行²・竹内謙介^{2,3}

1: (株)マリン・ワーク・ジャパン

〒236-0042 横浜市金沢区釜利谷東 2-16-32 トライアンジュ文庫 4F

2: 海洋研究開発機構 地球環境観測研究センター

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15

3: 現: 独立行政法人 水産大学校

〒759-6595 下関市永田本町2-7-1

キーワード: プロファイリングフロート、海面漂流時間、パラメータ設定、Argos 通信
要旨:

プロファイリングフロートで得られる観測データの鉛直分解能は、Argos 通信の処理能力に制約される。欠損のない観測プロファイルを得るためには、多数に分割されたデータの全てを受信する必要がある。そのためにはフロートの通信時間(海面漂流時間)を長くしなければならないが、これは同時にフロート観測にとって深刻な問題を引き起こしうる。本稿では、観測プロファイルに欠損が出現する割合(プロファイル欠損率)を統計的に求め、調節すべき海面漂流時間とデータ量の基準を示す。プロファイル欠損率の理論値を正確に推定するためには、フロート展開域におけるデータ受信確率の正確な値を用いることが肝要である。データ受信確率は高緯度ほど高く、同緯度では大陸から離れるほど高くなる傾向がある。データ量を固定して海面漂流時間だけを短くすると、データ受信確率の値によらずプロファイル欠損率は約 3-5%を境として急速に増大する。欠損プロファイルの予期せぬ頻発を避けるために、プロファイル欠損率が 3%以下になるようにフロートの海面漂流時間を設定すべきである。具体的には、2005 年 4 月現在と同様に 5 機の Argos 衛星が稼働している場合、メッセージブロック数が 24 の場合は 9 時間以上、同 16 の場合は 6 時間以上の海面漂流時間が必要である。

連絡先: 中島宏幸

〒237-0061 神奈川県横須賀市夏島町2-15 海洋研究開発機構
地球環境観測研究センター 気候変動観測研究プログラム 気付

Tel : 046-867-9828, Fax : 046-867-9835

E-mail: nakajimah@jamstec.go.jp

**How to set surface drifting time of profiling floats
to obtain profile data with less observational deficiency**

Hiroyuki Nakajima¹, Taiyo Kobayashi², Nobuyuki Shikama², and Kensuke Takeuchi^{2, 3}

1: Marine Works Japan Ltd.

2-16-32 Kamariyahigashi, Kanagawa-ku, Yokohama, 236-0062, Japan

2: Institute of Observational Research for Global Change

Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

2-15 Natsushima-cho, Yokosuka, 237-0061, Japan

3 (Present address): National Fisheries University

2-7-1 Nagata-Honmachi, Shimonoseki, 759-6595, Japan

Keywords: Profiling float, sea surface drifting time,
parameter setting, Argos communication system

Abstract:

In the current international Argo Project, the Argos communication system is used to relay observational data from profiling floats at sea surface to ground stations. The Argos system limits one transmission to a small quantity of 32 bytes, hence floats are required a longer stay at sea surface to transmit all data of a measured profile without deficiency. However, the longer period of sea surface drifting causes several serious problems for float observations. A new statistical method to decide the surface drifting time and observational layer number of a profile is developed to obtain measured profile with permissible observational deficiency. A deficiency rate estimated by this method agrees well to that obtained from observation when a suitable data-receiving rate is given, and the geographical distributions of data-receiving rate are shown in this study. When a float programmed to measure certain layers shortens period for sea surface drifting, the rate of profiles with deficient layers increases, and it does to fatal level as it exceeds 3-5%. In order to avoid unexpected frequent occurrence of deficit profiles, surface drifting time of floats should be set so that the deficiency rate is 3% or less. Specifically, under the similar condition of the Argos communication system as of 2005 April, surface drifting time should be set at 9 hours or longer when the message blocks are 24, and 6 hours or longer when they are 16.

Corresponding Author: Hiroyuki Nakajima

E-mail: nakajimah@jamstec.go.jp

1. はじめに

2000 年に開始のアルゴ計画によって、3000 機のプロファイリングフロート(以下ではフロートと記す)による全球海洋の即時監視システムの構築が進められている(The Argo Science Team, 2001)。海洋に展開されたフロートは 1000dbar 付近を漂流し、10 日に 1 度 2000dbar 以浅の圧力・水温・塩分を観測しつつ海面に浮上する。海面で観測データを送信した後、再び深層 1000dbar へと沈降する。2005 年 4 月末現在で展開されたフロート数は 1800 機を越え、フロートによる観測網の完成は 2007 年頃と予想されている。

この海洋観測網により、平均すると 300km 四方の海域について 10 日毎に海面から 2000dbar までの海洋データが 1 プロファイル得られるようになる。得られたデータは即時に公開されるので、海洋内部の現在の状態を把握できる(細田・湊, 2003)。さらに、大規模な海洋構造の時間変化を監視できる(水野, 2001)ので、長期予報や気候変動予測の精度向上が期待できる。また、アルゴ計画で得られた海洋観測データは、従来のものに比べて時間・空間分布密度が高いだけでなく、その季節毎の分布の差異はほとんどない。そのため、このデータを解析することにより、新たな海洋学的な知見がもたらされている。例えば Ohno et al. (2004)は冬季混合層の特性やその年々変化について言及しているし、Uehara et al. (2003)や Oka and Suga (2003)はモード水の形成過程について、従来の気候学データに基づいたものとは異なる描像を示している。

フロートから発信された観測データは、Argos 通信機能を備えた極軌道衛星(たとえば NOAA 衛星など: 以下では単に Argos 衛星と呼ぶ)を介して地上に転送される。この Argos 通信システム(Argos system, 1996)は信頼性や安定性が非常に高いため、アルゴ計画が目指す全球海洋観測網の通信システムに採用されている。アルゴ計画における Argos 通信システム利用の詳細は付録 A に示す。ここで問題となるのは、Argos 衛星のデータ処理能力が低いため、フロートは観測データを多数のメッセージブロックに分割して、30 秒間隔で送信しなければならないことである。従って、完全な観測プロファイルを得るためには、分割されたメッセージブロックを全て受信する必要がある。フロートは海面を漂流する間、この一連のメッセージブロックを繰り返し発信する。しかし通信は Argos 衛星がフロート上空に飛来したときにのみ可能である。そのため、全てのメッセージブロックを漏れなく受信するためには、非常に多くのメッセージブロックを受信する必要があり、フロートの海面漂流時間を長くすることが必要である。

しかし、フロートが海面を長時間漂流した場合、以下のような問題が発生する可能性が増大する。

- ・ 浅瀬への侵入や漂着 (Argo Project Office, 2005)
- ・ 漁民らによるフロートの拾得 (Argo Project Office, 2005)
- ・ 上記 2 件に引き続いて生じうる、フロートの人為的な破壊とそれに伴う事故の危険性 (Argo Project Office, 2005)
- ・ データ発信による電力消費の増大(データ発信による消費電力がフロートの全消費電力

に占める割合は約 55%(0-1000dbar の観測：Davis et al., 2001)、あるいは約 3-4 割 (0-2000dbar の観測：吉田, 2004, 私信))とそれに伴うフロートの短命化

- ・ フロート筐体への生物付着 (岡ら, 2002)とそれに伴うフロート浮力の喪失(水野, 2003)
- ・ センサーへの生物付着とそれに伴うデータ精度の劣化(たとえば Oka and Ando, 2004; Oka, 2005)

これらは、フロートを用いた海洋観測にとって深刻な問題であり、既に様々な対応がとられているし、現在でも改良が続けられている。しかしながら、上記の問題が発生する可能性を小さくするためにも、フロートの海面漂流時間は可能な限り短いことが望ましい。そのため、観測データ量や受信されないメッセージブロックの発生確率、およびその許容量を考慮した上で、フロートの海面漂流時間を設定する必要がある。

近年では、アルゴ計画に限らず数多くの海洋観測プロジェクトでフロートを用いた海洋観測が行われ始めている。海面漂流時間はフロート観測を行う際の重要なパラメータでありながら、その設定の際の基準や参考とすべき指標などは与えられていなかった。本稿は、フロートによって得られる観測プロファイルに欠損が出現する割合(プロファイル欠損率)を考慮することにより、フロート観測で採用すべき海面漂流時間の指標や基準を示すことを目的とする。また海面漂流時間を検討する過程で明らかになった、Argos 通信の現状についても報告する。

2. プロファイル欠損率の理論値の計算方法

プロファイル欠損率は、統計的な手法に基づくと、以下のように推定することができる。

フロートが海面を漂流する時間を T_{drift} (秒)とし、その間に N_{dat} 個に分割されたデータ(メッセージブロック)を T_{repeat} (秒)間隔で発信しているとする(表 1)。そのとき、フロートが発信できるメッセージブロックの総数 (N_{drift}) は $N_{drift} = T_{drift} / T_{repeat}$ 、同一メッセージブロックの発信数 (N_{repeat}) は $N_{repeat} = N_{drift} / N_{dat}$ となる。

Argos 通信システムを用いたデータ通信は、Argos 衛星がフロートの上空を飛来する時のみ可能となる。つまり、フロートから発信されたメッセージブロックのうち、受信されるものはその一部に限られる。この割合を実測値に基づいて与える。同一メッセージブロック受信数の平均実測値を E とすると、メッセージブロックを受信する確率 (P_{rec} : 以下ではデータ受信確率) は $P_{rec} = E / N_{repeat}$ となる。

受信されるメッセージブロックは、ランダムであると考えられるから、同一メッセージブロック受信数(つまり重複度)の頻度分布は $B(N_{repeat}, P_{rec})$ の二項分布に従うと仮定でき

る。この場合、あるメッセージブロックが全く受信されない確率(P_{norec})は以下のようになる。

$$P_{norec} = 1 - (1 - P_{rec})^{N_{repeat}}$$

つまり、あるメッセージブロックを受信することができないために、フロートで観測されたプロファイルデータの一部または全部が欠損する確率(プロファイル欠損率: $P_{deficit}$)は次のようになる。

$$\begin{aligned} P_{deficit} &= 1 - (1 - P_{norec})^{N_{dat}} \\ &\approx N_{dat} P_{norec} \quad (|P_{norec}| \ll 1) \end{aligned}$$

つまり、海面漂流時間 T_{drift} 、メッセージブロック数 N_{dat} 、データの発信間隔 T_{repeat} およびデータ受信確率 P_{rec} を用いて、上式を書き直すと、プロファイル欠損率 $P_{deficit}$ は以下のようになる。

$$\begin{aligned} P_{deficit} &= 1 - (1 - (1 - P_{rec})^{T_{drift}/N_{dat} T_{repeat}})^{N_{dat}} \\ &\approx N_{dat} (1 - P_{rec})^{T_{drift}/N_{dat} T_{repeat}} \end{aligned}$$

データ受信確率 P_{rec} を推定するために、2003 年 5 月 5 日から 5 月 31 日のデータ受信結果を用いる。データは、地球環境観測研究センターで運用中の APEX 型フロートから送信されたものに限り、着底などにより観測層数(メッセージブロック数)が大きく変化した観測プロファイルは除く。冗長検査(高槻ら, 2001)でエラーが検出されたメッセージブロックは受信できなかったものとして扱う。図 1 は本研究で用いる APEX 型フロートがデータを送信した位置(データ観測点)を示しており、対象期間中には青点で示した 63 プロファイル分の 1005 個のメッセージブロックを、延べ 13292 回受信した。なお、この期間中は ADEOS-II と NOAA-11 を含む 7 機の Argos 衛星が稼働していた(図 2)。

詳細は 5 章で述べるが、APEX 型フロートの海面漂流時間は必ずしも一定ではない。しかし、その変動幅は小さいことが分かっている(市川ら, 2001)ので、ここでは平均的な値として 9 時間を与える。フロートのメッセージブロックの発信周期は 30 秒、メッセージブロック数は 16 である(表 2)。

この期間における同一メッセージブロックの受信数(重複数)の平均値(E)は 13.23、その標準偏差は 3.30 であった。同一メッセージブロックの発信数は 67.5 であるから、推定されるデータ受信確率は 0.196 となる。図 3 は、実測された同一メッセージブロック受信数(重複度)と、 $B(N_{repeat}=67.5, P_{rec}=0.196)$ の二項分布から推定されるメッセージブロックの重複

度の頻度分布を比較したものである。実際のメッセージブロック受信数の重複度は二項分布でほぼ近似できることがわかる。また、上記の二項分布の標準偏差は 3.26 であり、実測値 3.30 と良く一致する。これらのことから先に述べた二項分布の仮定が正しいことが分かる。

このデータ受信確率 $P_{rec}=0.196$ を使って、プロファイル欠損率の理論値を求めたところ、 $6.4 \times 10^{-4} \%$ となった(表 2)。この期間中に受信した 63 プロファイル中に欠損は存在しない。この実測結果に基づいて、実海域のプロファイル欠損率を F -分布を用いて逆に推定すると、その信頼区間は信頼率 95% で 0-5.7% となり、理論値をその区間内に含む。つまり、上で示した方法で求められたプロファイル欠損率の理論値は、実測結果と一致している。

3. プロファイル欠損率の理論値と実測値との比較

2003 年 12 月以降、地球観測フロンティア研究システム(現 地球環境観測研究センター)では、従来よりも鉛直分解の高い観測プロファイル(メッセージブロック数は 24)が得られるように設定した APEX 型フロートの展開を開始した。しかし、2 機の Argos 衛星が順次機能を停止するという事態が発生して、利用できる Argos 衛星が減少(図 2 および付録 B を参照)し、推定されるデータ受信確率 P_{rec} は 0.172、0.142 と低下した。また、展開したフロートの海面漂流時間は 9 時間と 15 時間(付録 C を参照)である。そのため、2003 年 10 月から 2004 年 11 月にかけて、海面漂流時間とデータ受信確率の異なる組み合わせを持つ A-D の 4 通りの、受信したプロファイル総数および欠損のあるプロファイルの数の実測値が得られた(表 2)。この実測結果に基づき、前章で示したプロファイル欠損率の理論値の推定手法を検証する。

ケース A(フロート観測点は図 1 の黄)および B(同緑)では、受信したプロファイルのうち欠損を持つものは存在しない。理論的に予想されるプロファイル欠損率は、それぞれ約 0.5% および約 0.002% であり、この値は実測値から推定される範囲内(それぞれ 0-10.6%、0-0.9%)に入っている。

C の場合(観測点は図 1 の紫)、プロファイル欠損率の理論値は 2.4% 程度である。C のパラメータを持つフロートでは、受信した 249 プロファイル中、12% にあたる 30 プロファイルで欠損が発見された。この割合はフロートを用いた海洋観測を行う(もしくは観測計画を設計する)上で無視できない数値である。また、実測値から推定されるプロファイル欠損率は 8-17% の範囲(信頼率 95%)であり、理論値に比べて非常に大きい。理論値が実測値と乖離した原因は 4 章で検討するが、海域毎の Argos 通信の状況に大きな差異が存在したことが原因と考えられる。

ケース D(観測点は図 1 の赤)では 502 プロファイル中 1 プロファイル(0.2%)に欠損が生じていた。理論的に予想されるプロファイル欠損率は約 0.025 % であり、実測値から推定される範囲(0.005-1.1%)に収まっている。

4. Argos 通信システムを用いたデータ通信状況

本章では、Argos 通信システムを用いたフロートデータの通信状況について考察を加える。2 章で示した理論値の計算方法は、フロート-Argos 衛星間の通信状況は一様であると仮定している。しかしながら、実際の通信状況は、さまざまな事情によりばらつきがあると予想される。そこで、海域毎の差異と考えられるもの (4.1 章)と、フロートの機差や海面漂流時の状況など、フロート(もしくは、その時々通信時)に特有のもの (4.2 章)に分けて、フロート-Argos 衛星間の通信状況について考察を加える。

4.1 海域による通信状況の差異

図 4 に 5×5 度の海域毎に平均したデータ受信確率(P_{rec})の分布を示す。ただし、2002 年 10 月から 2004 年 11 月までの期間に受信されたデータのうち、2005 年 4 月現在で運用中の 5 機の Argos 衛星(図 2 を参照)を介して通信が行われたものを使って算出した。データ受信確率は高緯度ほど高く、低緯度ほど低い。例えば、15 度よりも赤道側の海域におけるデータ受信確率は 0.1-0.12 程度であるのに対し、40 度よりも極側では、多くの海域で 0.15 以上の値を示す。これは Argos 衛星が極軌道をとるために、高緯度ほど衛星が頻繁に飛来することに起因する。

同じ緯度帯で比較した場合、大陸から離れるほどデータ受信確率は高くなる傾向が認められる。北太平洋の場合、日本近海では 0.1 程度であるのに対して、大陸から離れるにつれて 0.15 以上の値を示すようになる。この傾向は、衛星の飛来頻度とは関係なくフロート-衛星間の通信状況を表す量の分布(図 5)に明瞭に現れる。図 5a はフロート-衛星間で通信が可能な時間のうち、実際にデータ通信が行われた時間の割合(以下ではデータ通信時間割合)を示し、図 5b は冗長検査でエラーが検出されるメッセージブロックの発生する割合(以下では通信エラー率)を示しており、前者では値が高いほど、後者では低いほど、通信状況が良好であることを意味する。つまり、大陸から離れた海域に展開中のフロートほど、衛星が上空を飛来した際にはより頻繁にデータ通信を行うことができ(図 5a)、通信途上にエラーが発生する割合は小さくなる(図 5b)。

大陸付近でデータ通信の状況が悪化する原因は不明であるが、社会活動で発せられるノイズが影響している可能性が高い。中島ら (2001)は日本南東沖に展開されたフロートのデータ通信の状況を時間別に調べ、日本時間 12-18 時ではデータの受信確率(本研究とは定義が異なる)と通信エラー率が 43%と 25%であり、同 0-6 時(それぞれ 56%と 17%)よりも通信状況が悪いことを明らかにしている。事実、日本近海では、データ通信時間割合および通信エラー率の値がそれぞれ 60-80%、20-40%であるのに対し、フィリピンやインドネシア近海では 70-85%、15-25%であり、通信状況は日本近海よりも良好であるといえる(図 5)。

ケース C のフロートの展開域は、北海道南東沖とアリューシャン列島沖に限られていた(図 1 参照)。これらの海域における通信エラー率は、それぞれ 25-45%と 25-30%であり、平均値 18%と比べて高い。また、データ通信時間割合は両海域とも約 60-70%で、全海域

の平均値(82%)と比べて 10%以上低い。この悪い通信状態のため、データ受信確率は北海道南東沖で 0.096、アリューシャン列島沖で 0.094 となり、プロファイル欠損率の推定に使用した 0.142 に比べて著しく低い(表 2、図 4 を参照)。データ受信確率を 0.096、0.094 としてプロファイル欠損率の理論値を計算すると 25.8%および 27.8%であった。同海域で取得されるプロファイルに欠損が生じる割合は 21.4%(84 プロファイル中 18 プロファイル)と 22.5%(40 プロファイル中 9 プロファイル)であり、理論値は観測事実をよく説明する(表 2：ケース C1 および C2)。

4.2 衛星受信レベルの違いによる通信状況の差異

フロート-衛星間のデータ通信の状況は、フロートに固有の状況(例えばフロートハードウェアの機差や電池消耗による電圧低下など)や、海面漂流時の状況(波高や海面密度など)にも影響されると考えられる。これらの影響は、結果としてフロート発信電波の強度の違いに集約される。しかし、実海域で運用中のフロートの発信電波強度を調べることはできないため、衛星が受信した電波の強度(Argos 通信システムでは衛星受信レベルと呼ぶ)でこれに代える。本節では衛星受信レベルが Argos 通信の状況(データ通信時間割合や通信エラー率)にどのように影響するかを調べた。

解析期間(2002 年 10 月から 2004 年 11 月)中に、Argos 衛星がフロート上空を飛来する毎に衛星受信レベルとデータ通信時間割合・通信エラー率を求めた。図 6 はそれらの相関を示したもので、図 6a はデータ通信時間割合と衛星受信レベルの、図 6b は通信エラー率と衛星受信レベルの関係を示している。衛星受信レベルが下がるにつれて、データ通信時間割合は低く(相関係数 0.204)、通信エラー率は高くなる(相関係数-0.371)傾向が認められる。つまり、フロート-衛星間の通信状況は、衛星受信レベルの低下に伴って悪化する傾向がある。また、図 6a よりも図 6b のほうが、相関係数と回帰直線の傾きの絶対値が大きいことから、衛星受信レベルの低下は、データ通信時間割合の低下よりも通信エラー率の上昇を引き起こしやすいといえる。中島ら(2001)は、衛星受信レベルが低い場合は通信エラー率が相対的に高くなることを指摘しており、これは本研究の結果と一致する。

図 7 に海域別に平均した衛星受信レベルの分布を示す。インド洋で値がやや高く、日本近海ではやや低い傾向がある。しかし、海域によらずバラバラに分布していると言って良く、データ受信確率(図 4)やデータ通信時間割合(図 5a)、通信エラー率(図 5b)に見られるような、海域毎に特徴のある組織だった分布ではない。これは衛星受信レベルがフロートのおかれた個々の状況に大きく依存するためであろう。図 6 では、衛星受信レベルが約 -115dBm のデータが高い頻度で存在するのが認められるのに対し、図 7 ではそのような高い衛星受信レベルを示す海域は存在しない。これは、同一海域に値の低いデータが相当数存在し、海域平均として高い値を維持できないことを示す。このことも、衛星受信レベルが個々のフロートの状況に大きく依存していることを示唆する。中島ら(2001)では、衛星受信レベルとデータ受信確率の間には相関があるようには見えないとの指摘がなされている

が、本研究で示した衛星受信レベルの海域分布も彼らの結果を支持するといえる。

つまり、衛星受信レベルは、個々のフロートの「機差(ハードウェアや海面漂流時の状況を含む)」と呼べる部分に大きく左右されているが、それがフロート-衛星間のデータ通信に及ぼす影響は小さいといえる。

以上をまとめると、Argos 通信システムによるフロート-衛星間のデータ通信の状況は次のようになる。

- ・ Argos 衛星が極軌道をとるため、通信が可能となる頻度は高緯度ほど高い。その結果、データ受信確率は高緯度ほど高くなる。
- ・ 大陸の近くでは、おそらく社会活動で発せられるノイズの影響により通信状況は悪くなる。特に日本近海におけるデータ受信確率の低下は著しい。
- ・ 衛星受信レベルが高いほど、通信途上のエラーの発生率が低下するなどデータ通信状況は良好になる傾向が認められる。しかし、その影響は小さい。

5. 最適な海面漂流時間

プロファイル欠損率は 2 節で示した方法で理論的に推定でき、実測値とほぼ一致する結果が得られていることが分かった。そこで本節では、最適な海面漂流時間とデータ量の組み合わせの指標を示す。フロートを用いた海洋観測を計画する際、各観測者が許容できるプロファイル欠損率は観測プロジェクトの性格によって異なるだろう。そこで、本稿ではメッセージブロック数と海面漂流時間を与えた時のプロファイル欠損率を示すことで、これに代える。

プロファイル欠損率は、観測者が設定可能なパラメータ(表 1 参照)ばかりでなく、データ受信確率によっても大きく変わる。2005 年 4 月現在で 5 機の Argos 衛星が運用しており(図 2)、その状況下におけるデータ受信確率は平均で 0.142 であった(付録 B を参照)。この値は海域によって変化するが、北太平洋のほぼ全域でおおよそ 0.1-0.2 の範囲に入る(図 4 を参照)。また、近い将来には新たな Argos 衛星が打ち上げられ、6 機体制の運用が行われる予定である(図 2)。そこで、データ受信確率を 0.1, 0.142, 0.172, 0.2 と変化させた 4 つの場合について、メッセージブロック数と海面漂流時間を変えたときに予想されるプロファイル欠損率を計算した(図 8)。いずれの場合もフロートの発信周期は 30 秒に固定した。

観測層数とメッセージブロック数との関係は、次のようになっている。圧力・水温・塩分だけを観測する標準的なフロートの場合、1 メッセージブロックに 5 層の観測データが格納されている。ハードウェア情報の送信に 1 ないし 2 個のメッセージブロックを必要とするので、100 層からなる観測プロファイルを得ようとした場合、メッセージブロック数は 21-22 となる。

本研究では、簡単のためフロートの設定パラメータとして海面漂流時間を与えている。既存のフロートのうち、PROVOR 型は海面漂流時間を厳密に指定することが可能である。

APEX 型の場合は、up_time と呼ばれる時間を調節することにより、海面漂流時間を制御することができる。しかし、この時間にはフロートが海面を漂流する時間の他に、プロファイル深度から海面まで浮上するのに要する時間が含まれている。後者に要する時間は、2000dbar から観測を開始する場合は約 6-6.5 時間、1500dbar からの場合は約 4.5 時間(地球環境観測研究センターで運用中の APEX 型フロートの場合)であり、フロートの機差や海洋の鉛直水温・密度構造などの影響(伊澤ら, 2001)を受けて若干変動する(市川ら, 2001)。また稀に、海底の泥がフロートに付着するなどして機体重量が増加することがあるが、その場合は、海面への浮上に要する時間はさらに長くなる。

図 8 から明らかなように、データ受信確率とデータ量(メッセージブロック数)が一定の場合、海面漂流時間を短くしていくと、プロファイル欠損率は約 3-5%を境として急速に増大する。そのため、極めて特殊な観測目的がある場合を除き、プロファイル欠損率が 3%以下になるように、フロートの海面漂流時間を設定するのが安全であろう。特に APEX 型フロートを用いる場合、プロファイル欠損率は、フロート展開域の電波状況やハードウェアの機差の他に、海面漂流時間の変化によっても影響を受けることを考慮しておく必要がある。なお、3%のプロファイル欠損率とは、アルゴ計画で構築される海洋観測網によって、熱帯域の 10×10 度の海域内で 1 ヶ月間に得られる約 30-40 のプロファイルのうち、1 本程度に欠損が存在することに相当する。また、フロートは通常 150 回の観測を行えるように設計されている(たとえば水野, 2001)ので、その生涯で欠損があるプロファイルを観測する頻度は 4-5 回となる。

最後に、具体的な海面漂流時間の目安を述べる。2005年4月現在と同じく5機のArgos衛星が稼働しており(データ受信確率は $P_{rec}=0.142$: 図4bを参照)、許容できるプロファイル欠損率を3%とした場合、メッセージブロック数が24 (110程度の観測層からなるプロファイル)の場合には、フロートは9時間以上の海面を漂流する必要があり、メッセージブロック数が16 (70程度の観測層)の時には、6時間以上の海面漂流時間を設定する必要がある。

6. まとめ

海洋観測にフロートを用いる際、その観測層数の増大の制約となっているのはArgos通信システムのデータ処理能力の低さである。そのため、フロートは観測したデータを、複数のメッセージブロックに分割し、送信しなければならない。欠損のないフロートデータを得るためには、メッセージブロックを漏れなく受信できるように、フロートの海面漂流時間とデータ量(観測層数)を調節する必要がある。しかし、長時間の海面漂流はフロート観測にとって数多くの厄介な問題を引き起こしうる。

本稿では、観測プロファイルに欠損が出現する割合(プロファイル欠損率)を統計的に求める方法を紹介し、調節すべき海面漂流時間とデータ量の基準を示した。これらのパラメータに適切な値を設定するには、予想されるプロファイル欠損率を正確に推定することが必要となるが、この値はこれらの調整可能なパラメータだけでなく、フロート展開域のデ

ータ受信確率に大きく依存する。データ受信確率は、Argos衛星が極軌道をとるために高緯度ほど高く、社会活動によって発せられるノイズの影響のためか、同緯度では陸地から離れるほど高くなる傾向がある。特に日本近海は、Argos通信システムを用いた通信状況は他海域に比べて悪い。本研究で紹介したプロファイル欠損率の理論的な推定方法は、実際にプロファイルに欠損が生じる割合をほぼ正確に予想できるが、そのためには海域特性を考慮したデータ受信確率を計算に用いなければならない。

データ量を固定して海面漂流時間だけを短くしていくと、データ受信確率の値に関わらずプロファイル欠損率は約3-5%を境として急速に増大する。予期せぬ欠損プロファイルの頻発を避けるためには、プロファイル欠損率が3%以下になるようにフロートの海面漂流時間を設定すべきである。具体的には、2005年4月現在と同じく5機のArgos衛星が稼働している(データ受信確率は $P_{rec}=0.142$)とした場合、メッセージブロック数が24の時には9時間以上、同16の時には6時間以上の海面漂流時間が必要である。

付録 A アルゴ計画における Argos 通信システムの利用

Argos 通信システムは、フランス国立航空宇宙センター、アメリカ航空宇宙局、アメリカ海洋大気局によって 20 年以上開発が続けられてきた、衛星を用いた全世界通信システムである(Argos system, 1996)。フロートを用いた海洋観測は、数年程度継続するのが普通であるため、その通信システムにはデータ配信に遅延や欠落がないなどの高い信頼性が要求されると同時に、長期にわたって安定的に運用されるものでなければならない。特に、アルゴ計画では全球的な即時全球海洋観測網の恒常的な運用を目指しているため、その通信システムの信頼性や安定性に非常に高いものが要求される。Argos 通信システムはこの条件を満足しており、アルゴ計画に限らず多くの海洋・気象プロジェクトや、水産、環境・動物保護などの分野で利用されている(Argos system, 1996)。

フロートにより観測されたデータは、Argos 衛星を介して地上に転送される。Argos 衛星は、高度 850km、周期 102 分、軌道面速度は毎時西向き 25 度で赤道での軌道間の距離は 2800km の太陽同期の極軌道を航行しており(図 A)、2005 年 4 月現在で 5 機の Argos 衛星が運用されている(図 2 を参照)。衛星は、衛星直下の点から半径約 2500km の地表面の範囲と通信可能であり、フロート-衛星間で通信が持続する時間は、1 回当たり平均で 10 分、最長で 15 分である。Argos 衛星は極軌道を航行するので、高緯度になるほど重複する通信可能範囲が増加する。そのため、1 つの衛星が地上のある Argos 送信機の通信可能範囲を通過する 1 日当たりの回数は、赤道では 3 もしくは 4 回であるが、極では 14 回となる。

しかし、Argos 通信システムのデータ処理能力は高いとはいえない。Argos 衛星が一度に処理できるデータ量は 32byte に限られ、同一の Argos 発信器からのデータ発信周期は最短で 30 秒に制限されている。そのため、フロートによって観測されるデータは、複数のメッセージブロックに分割されて、Argos 衛星に向けて繰り返し送信されている。例えば、フロートが 448byte のデータ(これは約 60 層の圧力・水温・塩分の観測データに相当する)を送

信する場合、データは 14 個($32 \times 14 = 448$)のメッセージブロックに分割されて送信される。全てのデータが順調に転送できたとしても、最短で 6 分 30 秒 ($30 \times (14 - 1)$) の通信時間が必要であり、発信周期が 45 秒や 60 秒、90 秒に設定されているフロートの場合は、さらに長い時間が必要となる。実際には、通信可能な時間帯が Argos 衛星飛来時に限られる上、通信途上でデータエラーが発生したりすることがあるため、フロートは一連のメッセージブロックを繰り返し送信しなければならない。なお、Argos 通信システムで送信されるメッセージブロックには冗長検査コードが付加されており、通信エラーの検出が可能となっている(高槻ら, 2001)。

付録 B

2003 年の秋以降、Argos 衛星が順次運用を停止し、その結果データ受信確率が当初の推定値 0.196 から低下した。ここでは Argos 衛星の数が減少した理由を説明し、その状況下のデータ受信確率の値を順次示す。

B.1 ADEOS-II の通信途絶 (2003 年 10 月 25 日)

ADEOS-II は、2003 年 5 月 5 日から Argos 機能の運用を開始した。しかし、2003 年 10 月 25 日に通信が途絶し、Argos 機能も使用不可能となった(図 2 を参照: 宇宙航空研究開発機構, 2003)。2003 年 5 月 5 日から 5 月 31 日のデータから、ADEOS-II を除く 6 機の Argos 衛星を経由して受信したデータに基づいてデータ受信確率を求めた場合、値は 0.172 となった。

B.2 NOAA-11 の運用停止 (2004 年 6 月 16 日)

老朽化が進んでいた NOAA-11 が 2004 年 6 月 16 日に運用停止となった(図 2 を参照)。B.1 章と同様に、2003 年 5 月 5 日から 5 月 31 日のデータから、ADEOS-II と NOAA-11 を除く 5 機の Argos 衛星を経由して受信したデータに基づいてデータ受信確率を推定したところ、0.142 となった。

付録 C 15 時間の海面漂流時間を行うフロートについて

15 時間の海面漂流を行うフロートは、地球観測フロンティア研究システムで新たに導入した Park and Profile 型の観測シークエンスを持つ APEX 型フロートのうち、導入直後(2003 年 12 月から 2004 年 3 月)に投入したものである。この長時間の海面漂流は意図したものではなく、フロート製造会社の取扱説明書に記載の誤りがあり、パラメータの設定を誤ったためである。本来の意図通りに海面漂流時間を 9 時間に設定した Park and Profile 型フロートは、その後 2004 年 5 月から投入が開始された。

謝辞

本稿をまとめるに当たり、(株)キュービック・アイの弥富秀文氏・長坂政幸氏には、受信レベルデータを提供していただくとともに、Argos通信システムの現状について、助言していただきました。また、匿名の査読者からは大変有用なコメントをいただきました。記して謝意を表します。

References

- Argo Project Office (2005): Report of the Argo executive meeting. *Argonautics, Newsletter of the international Argo Project*, **6**, 6.
- Argos system (1996): *Argos User's Manual 1.0.*, Argos CLS, France, 176pp.
- Davis, R. E., J. T. Sherman, and J. Dufour (2001): Profiling ALACEs and other advances in autonomous subsurface floats. *J. Atmos. and Ocean. Tech.*, **18**, 982-993.
- 細田滋毅・湊信也 (2003): アルゴフロート・トライトンブイデータを用いた太平洋の水温・塩分客観解析. *海洋科学技術センター試験研究報告*, **48**, 67-84.
- 市川泰子・高槻靖・水野恵介・四竈信行・竹内謙介 (2001): アルゴフロートの滞在深度における流速とその誤差の見積もり. *海洋科学技術センター試験研究報告*, **44**, 81-90.
- 伊澤堅志・水野恵介・宮崎基・井上亜沙子・安藤健太郎・高槻靖・小林大洋・竹内謙介 (2001): プロファイリングフロートの重量調整について. *海洋科学技術センター試験研究報告*, **44**, 181-196.
- 水野恵介 (2001): アルゴ計画の現状. *日本深海技術協会会報*, **30**, 3-9.
- 水野恵介 (2003): アルゴフロートのターミネーション方法について. *海の研究*, **12**, 1-21.
- 中島宏幸・高槻靖・水野恵介・竹内謙介・四竈信行 (2001): アルゴフロートの通信状況. *海洋科学技術センター試験研究報告*, **44**, 153-161.
- Ohno, Y., T. Kobayashi, N. Iwasaka, and T. Suga (2004): The mixed layer depth in the North Pacific as detected by the Argo floats. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L11306, doi:10.1029/2004GL019576.
- Oka, E. (2005): Long-term sensor drift found in recovered Argo profiling floats. *J. Oceanogr.* **61**, 775-781.
- Oka, E. and K. Ando (2004): Stability of temperature and conductivity sensors of Argo profiling floats. *J. Oceanogr.*, **60**, 253-258.
- 岡英太郎・伊澤堅志・井上亜沙子・安藤健太郎・四竈信行・水野恵介・末広孝吉・竹内謙介 (2002): Argo フロートの回収は可能か? *海洋科学技術センター試験研究報告*, **46**, 147-155.
- Oka E. and T. Suga (2003): Formation region of North Pacific Subtropical Mode Water in the late winter of 2003. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2205, doi:10.1029/2003GL018581.
- 高槻靖・市川泰子・小林大洋・水野恵介・四竈信行・竹内謙介 (2001): フロートデータ自動処理・品質管理システムの構築. *海洋科学技術センター試験研究報告*, **44**, 17-28.

- The Argo Science Team: Roemmich, D., O. Boebel, Y. Desaubies, H. Freeland, K. Kim, B. King, P.-Y. LeTraon, R. Molinari, W. B. Owens, S. Riser, U. Send, K. Takeuchi and S. Wijffels (2001): Argo: the global array of profiling floats. p. 248-258. In *Observing the Oceans in the 21st Century*, ed. by C.J. Koblinsky and N. R. Smith, Godae Project Office, Bureau of Meteorology, Melbourne, Australia.
- 宇宙航空研究開発機構 (2003): 環境観測技術衛星「みどりII」の運用断念について (2003年10月31日 環境大臣談話), *ILAS/ILAS-II Newsletter*, **64**.
- Uehara, H., T. Suga, K. Hanawa and N. Shikama (2003): A role of eddies in formation and transport of North Pacific Subtropical Mode Water. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1705, doi:10.1029/2003GL017542.

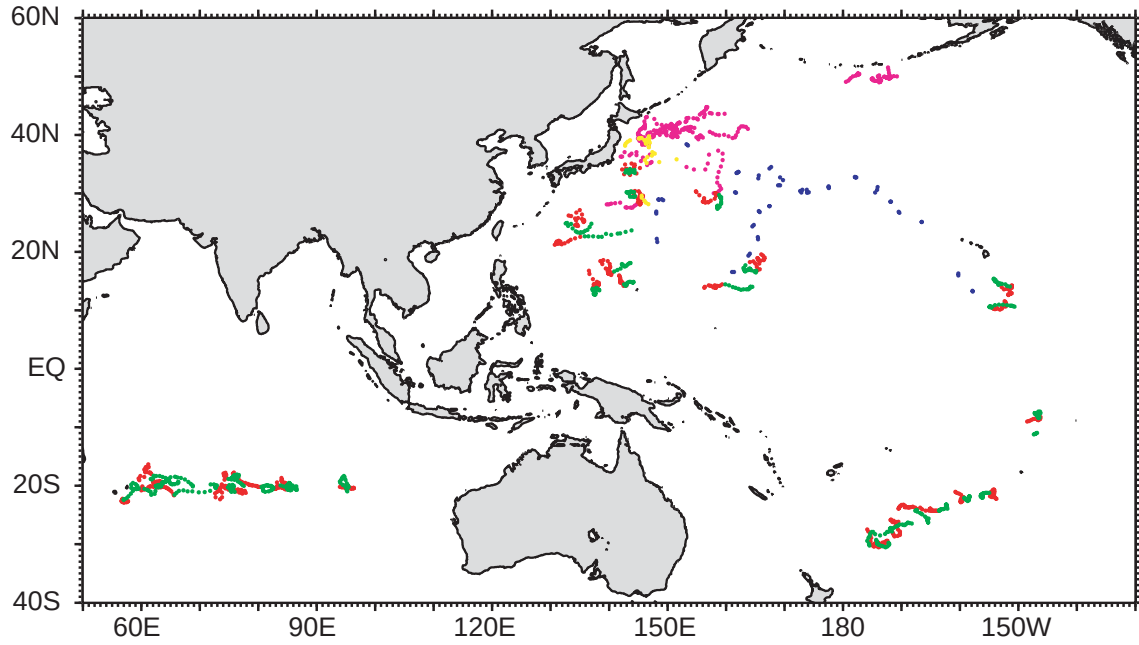


Fig. 1: Blue represents the locations of 63 profiles measured by APEX type floats used for the estimation of data-receiving probability (P_{rec}) in the period from 5 May to 31 May, 2003. Yellow, green, purple, and red represent the data positions to verify the statistical estimation of $P_{deficit}$ for the cases A, B, C, and D of Table 2, respectively.

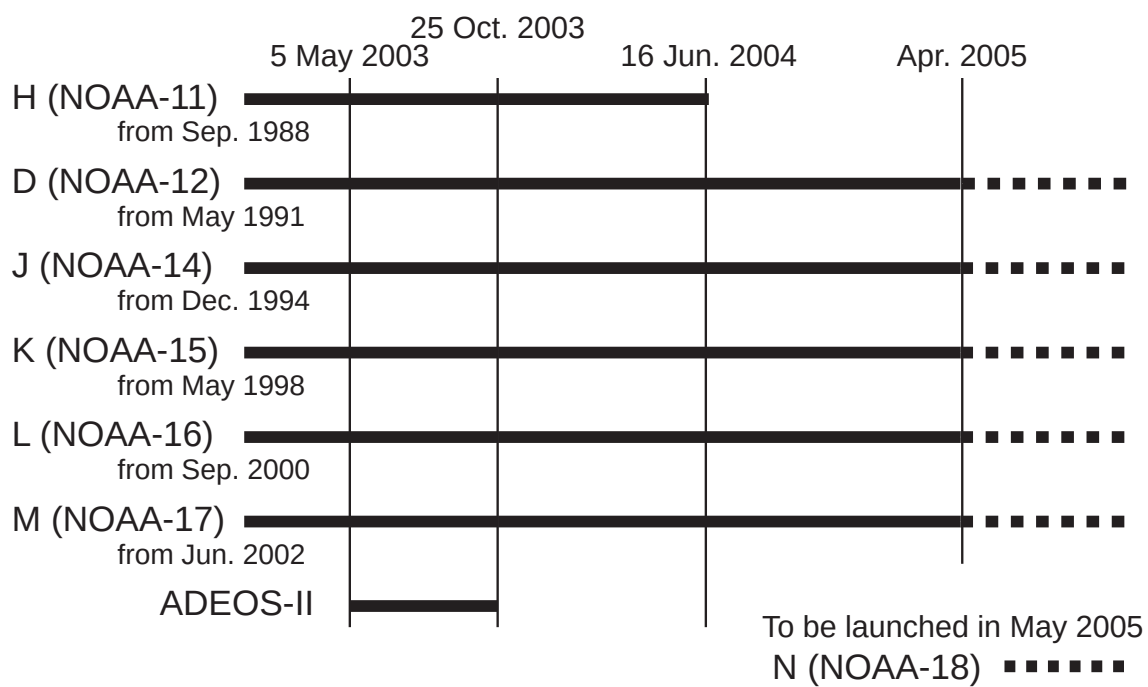


Fig. 2: Schedule of Argos satellites operation.

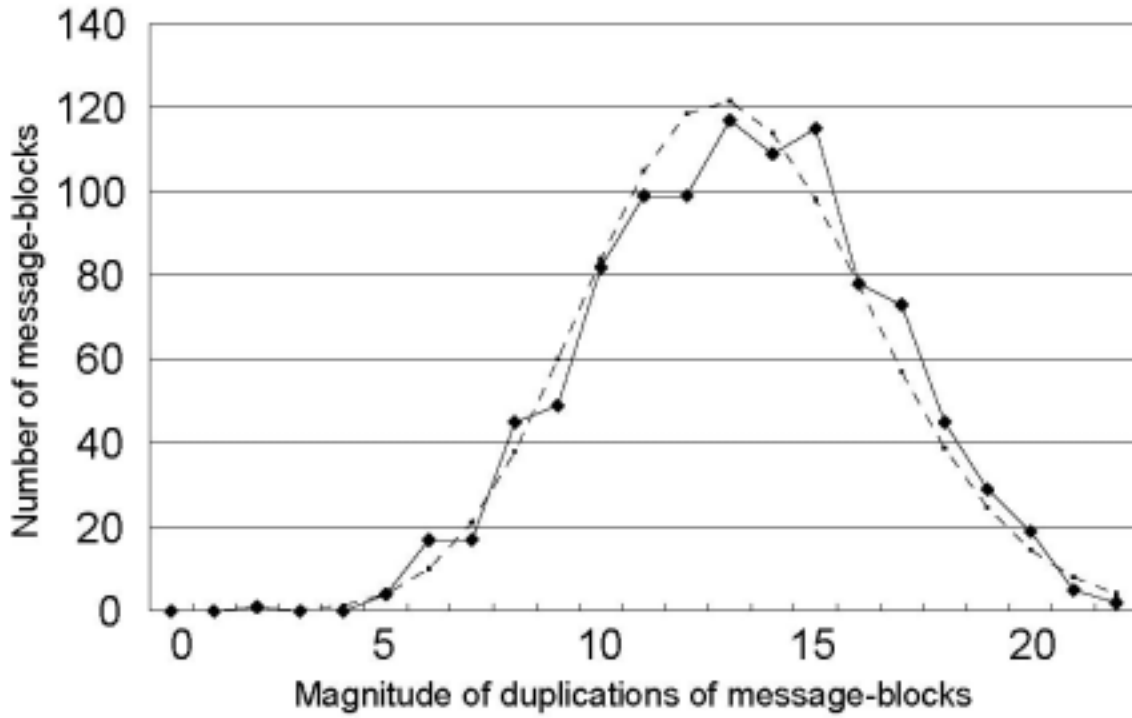


Fig 3: The frequency distribution for duplications of received message-blocks. Solid line with diamonds represents the statistics based on the actual data-receiving of 63 profiles from 5 May to 31 May, 2003, and dashed line represents the theoretical estimation by the function of $B(N_{repeat}=67.5, P_{rec}=0.196)$. The parameters of floats are every 30 seconds data transmission, 9 hours drifting on the sea surface, and 16 message-blocks.

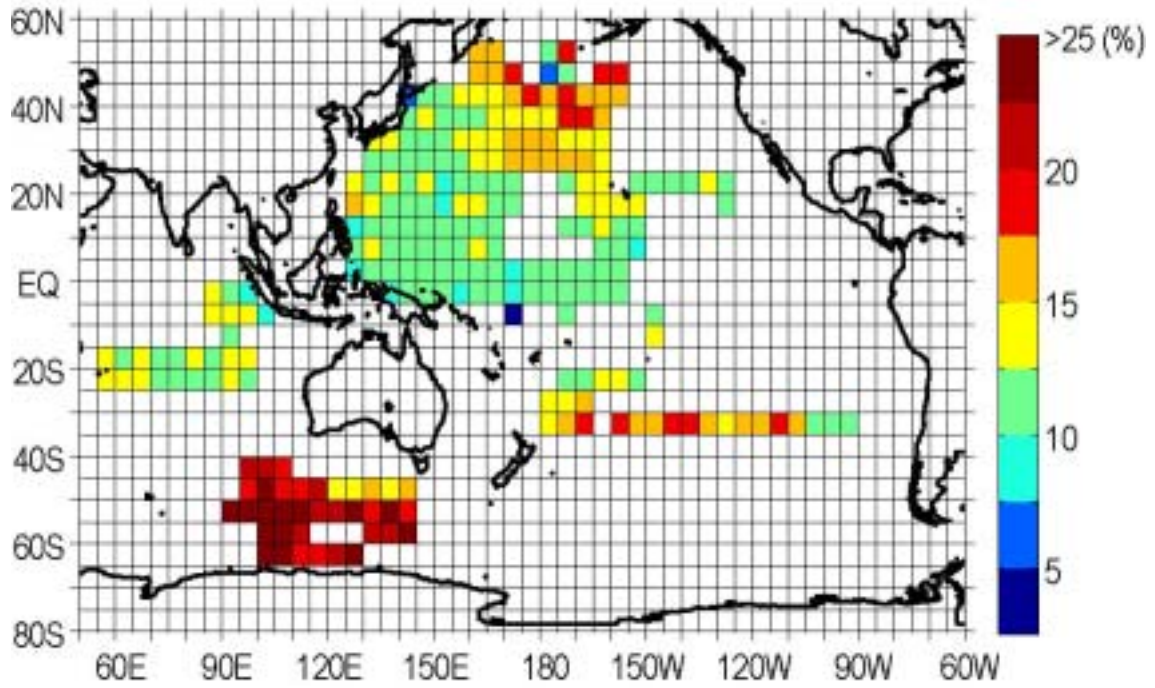


Fig. 4: Geographical distributions of data-receiving probability, P_{rec} . The values are obtained as averages from October 2002 to November 2004.

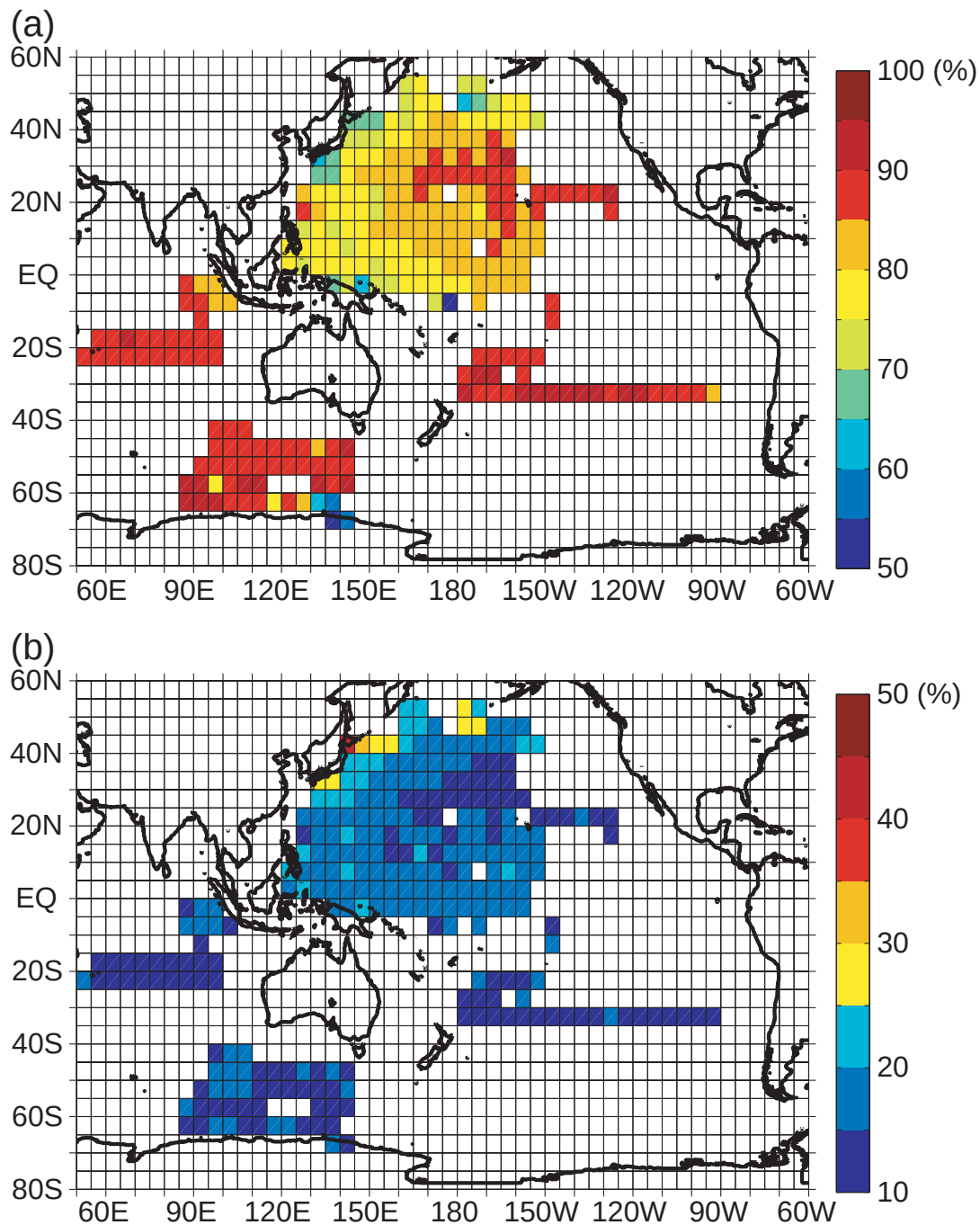


Fig.

5: Geographical distributions of (a) the receiving rate and (b) the probability of the data transmission errors. The former is determined as the ratio between the period in which float data are actually received and that in which the float can communicate Argos satellites. The values are obtained as averages from October 2002 to November 2004.

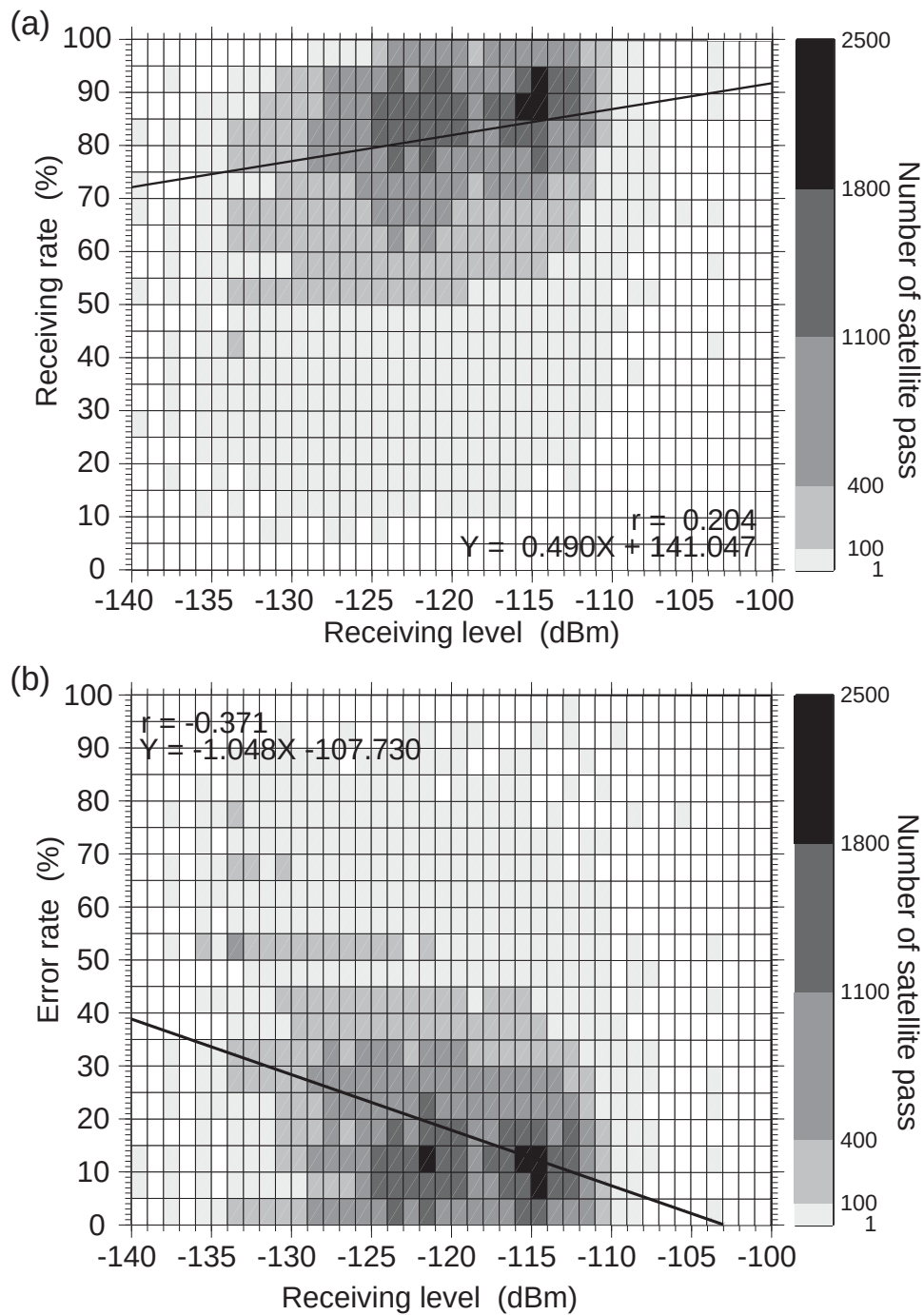


Fig. 6: Relation between receiving radio-level of Argos satellites and (a) the receiving rate and (b) the probability of the data transmission errors. The values are obtained as averages from October 2002 to November 2004.

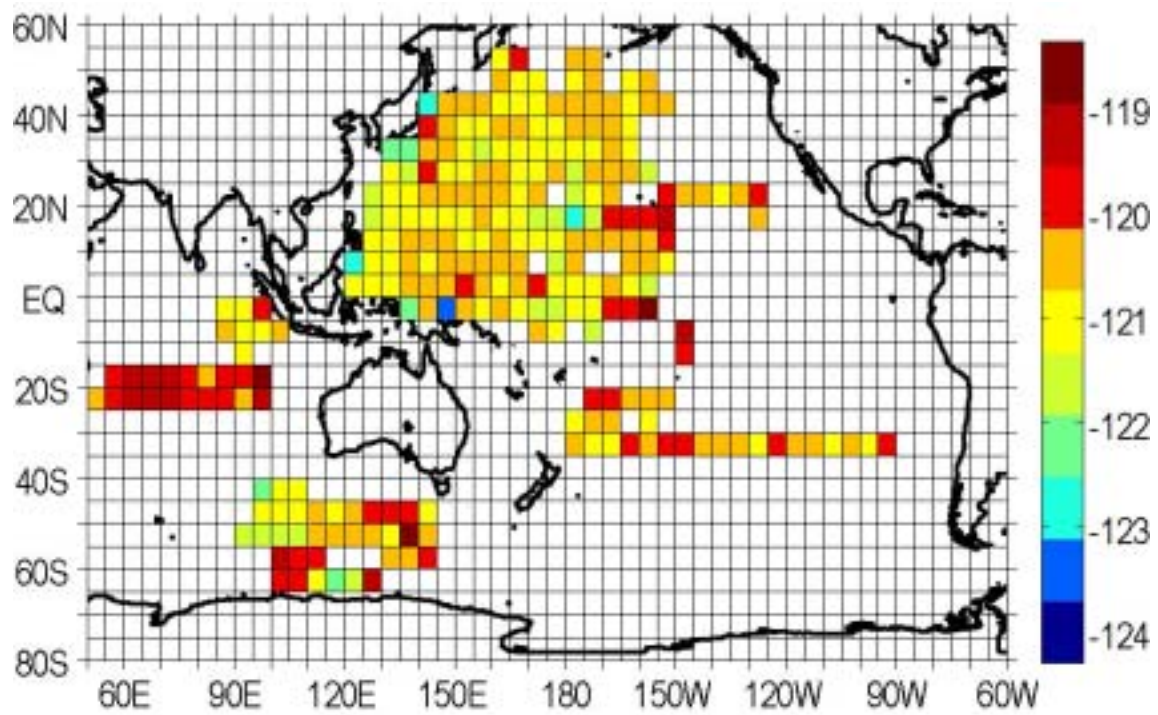


Fig. 7: Geographical distribution of receiving radio-level of Argos satellites (unit is dBm). The values are obtained as averages from October 2002 to November 2004.

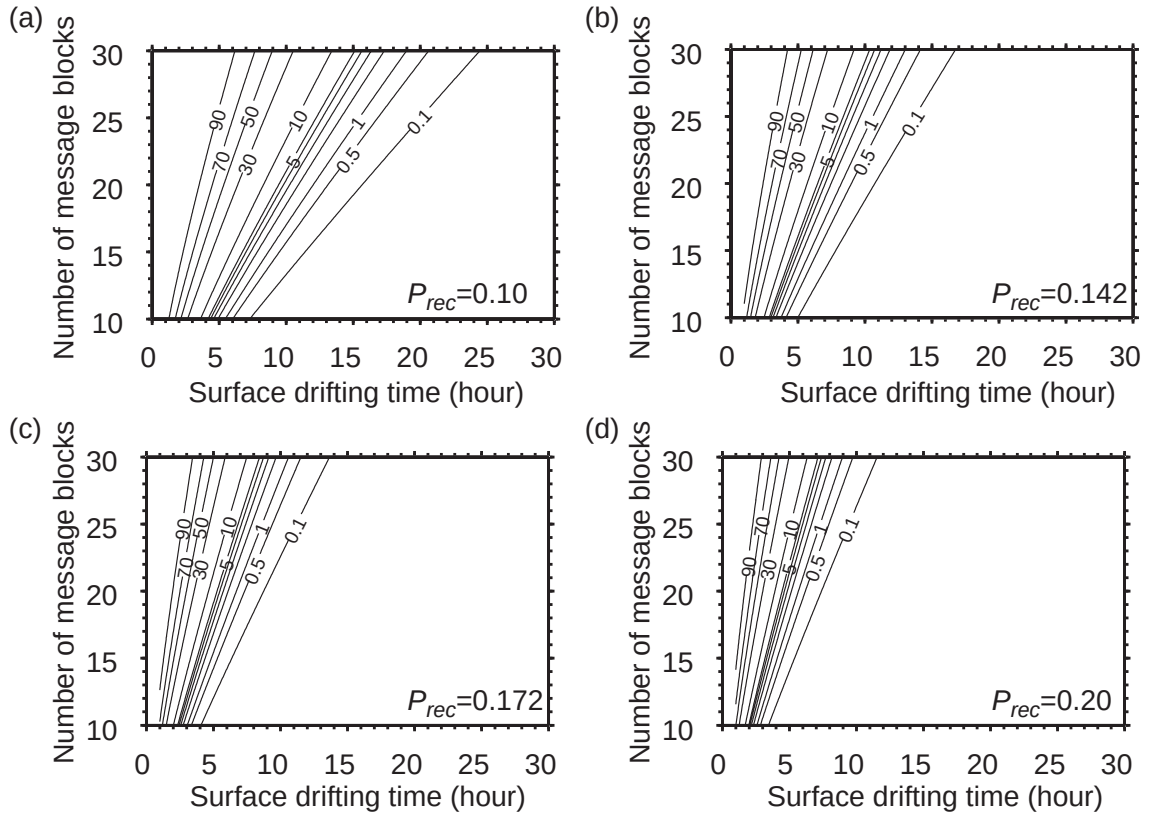


Fig. 8: Probability of deficient profiles, $P_{deficit}$ (unit is %) as the function of floats' surface drifting time and number of message blocks. Data-receiving probability (P_{rec}) is set as (a) 0.10, (b) 0.142, (c) 0.172, and (d) 0.20, respectively. In all cases, floats dispatch message blocks every 30 seconds during their surface drifting.

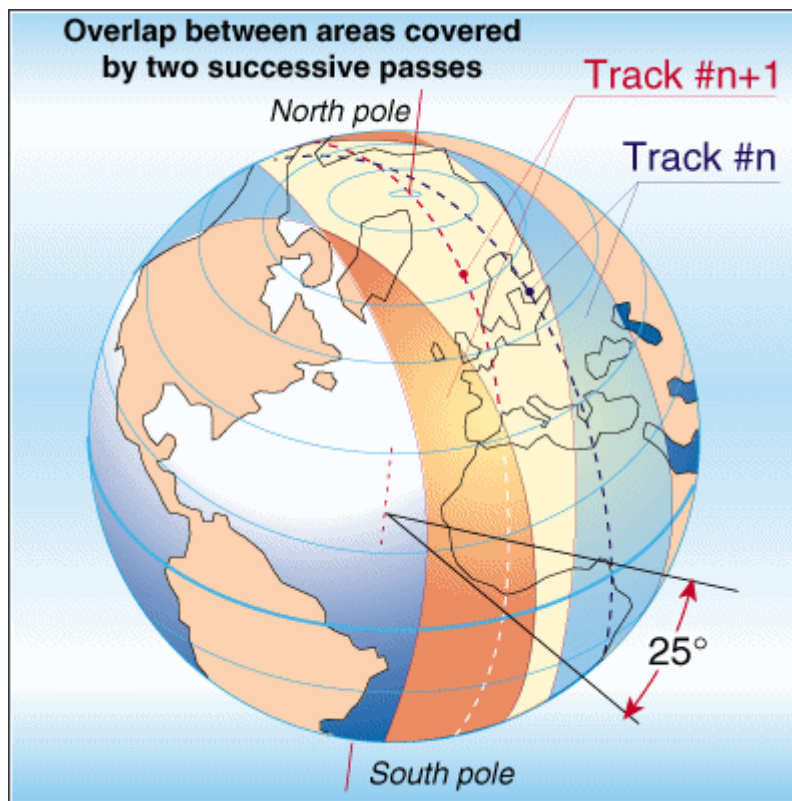


Fig. A: Schematic figure of the orbit of Argos satellite (from Argos User's Manual 1.0, Argos System, 1996).

Table 1: Float parameters used for theoretical estimation of the probability of profiles with deficient layers.

Parameters		Note
T_{drift}	Surface drifting time	○
N_{dat}	Number of message blocks	△
T_{repeat}	Period of dispatching message blocks	△
P_{rec}	Data-receiving probability	×

○ : Able to be changed by users, △ : To be determined by user at order of floats, × : To be provided by circumstance in deployed regions.

Table 2: Probability of profiles with deficient layers estimated by the statistical method and the observed results.

Case	Theoretical estimations				Observations			
	T_{drift} (sec)	N_{dat}	P_{rec}	$P_{deficit}$ (%)	Total	deficit profiles	ratio (%)	confidence interval (%) (min - max)
May 5, 2003 to May 31, 2003 [#]								
	32400	16	0.196	6.4E-04	63	0	0	(0 - 5.69)
Oct. 25, 2003 to Jun. 15, 2004 ^{\$}								
A	32400	24	0.172	0.49	33	0	0	(0 - 10.58)
B	54000	24	0.172	1.7E-03	441	0	0	(0 - 0.83)
Jun. 16, 2004 to Nov. 30, 2004 ^{&}								
C	32400	24	0.142	2.44	249	30	12.05	(8.28 - 16.75)
C1	32400	24	0.096	25.83	84	18	21.43	(13.22 - 31.74)
C2	32400	24	0.094	27.76	40	9	22.50	(10.84 - 38.45)
D	54000	24	0.142	2.5E-02	502	1	0.20	(5.0E-03 - 1.10)

7, 6, and 5 Argos satellites were under operation in the periods marked by #, \$, and &, respectively. See its details in Appendix B. T_{repeat} is 30 seconds in all cases.

Confidence intervals of ratio of deficient profiles are obtained by 95% confidence level. Examined regions for the case C1 and C2 are 40-45°N, 145-155°E and 45-50°N, 180-170°W, respectively.